

文章编号 1004-924X(2008)10-1864-05

探测海洋目标的光学遥感器工作波段选择

万志^{1,2},任建伟¹,李宪圣¹,刘则洵¹,任建岳¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要:在遥感器的研制任务中,工作波段的选择对于目标探测和识别至关重要。针对海洋目标探测这种从大背景下探测小目标的应用,分析了限制目标探测的主要因素。以深海水域舰船目标为例,利用大气辐射传输模型 MODTRAN 4.0 模拟计算了某型号遥感器在可见光谱区域内各个波段的目标/背景对比度和信噪比,并以此作为依据得出结论—以海洋目标探测为主要目的的宽波段遥感器的最佳工作波段为 0.5~0.9 μm 。

关键词:海洋遥感;光学遥感器;目标探测;波段选择;信噪比

中图分类号:TP73;P716.42 文献标识码:A

Waveband selection of optical remote sensor for detecting marine target

WAN Zhi^{1,2}, REN Jian-wei¹, LI Xian-sheng¹, LIU Ze-xun^{1,2}, REN Jian-yue¹

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

Abstract: For developing a remote sensor, the selection of operating waveband is one of the most important factors for detecting and identifying target. Aiming at detecting marine target from large area background, the major factors restricting target detecting were analyzed in this paper. By taking a-byssal pelagic ship target as an example, the Signal to Noise Ratios(SNRs) and contrasts between target and background at different wavebands within visible/near infrared region were calculated using atmospheric radiative transfer code—MODTRAN 4.0, and experimental results show that the best waveband is from 0.5 μm to 0.9 μm for wide waveband remote sensor aiming at marine target detecting.

Key words: marine remote sensing; optical remote sensor; target detection; waveband selection; Signal to Noise Ratio(SNR)

1 引 言

高光谱分辨率的光学遥感器越来越多地应用于海洋目标观测,使得详查海洋目标的光谱特征成为可能,然而空间分辨率、光谱分辨率和辐射分辨率之间存在着相互制约的关系,空间或光谱分辨率的提高都是以牺牲部分辐射探测能力为代价的。从已发射的海洋光学遥感器来看,普遍存在光谱通道多、空间分辨率较低的特点,光谱通道多数为 8 个以上,而地面像元分辨率大多在几百到上千米。这些遥感器主要针对大范围海洋资源勘探及环境调查,对于探测海洋上的舰船等小尺度目标来说空间分辨率已成为限制目标探测的主要因素。与陆地上目标探测的情况有所不同,海洋上的目标通常是大面积均匀背景下的点目标,粗略看上去似乎更容易被发现和提取,但实际上由于大气散射、衰减及交叉辐射的影响,对比度反差原本较小的目标和背景其实很难区分^[1-2]。解决这个矛盾的有效途径之一是选用灵敏度更高的探测器(比如 TDI CCD 器件)和大口径反射式光学系统以减小辐射能的损失并增强辐射探测能力,而根据感兴趣目标的光谱特征选择合适的工作波段则是更加经济且实用的手段。

本文从辐射传输和能量转换的角度分析了限制海洋目标探测的主要因素,利用辐射传输模型软件 MODTRAN 4.0 模拟典型观测条件下的大气光学参数和几何关系,计算了可见/近红外光谱区域各窄带波段内到达遥感器入瞳处的目标和背景辐亮度,以目标/背景对比度和信噪比为依据,讨论了海洋光学遥感器工作波段的优选问题,旨在为主要针对海洋目标探测的光学遥感器设计提供参考。

2 影响和限制目标探测的因素

对于工作在可见光波段的被动成像式遥感器来说,其工作原理的基本思想和物理基础是探测目标与背景之间在反射太阳辐射上的差异,即遥感器所感知的是其像面接收到的来自目标与背景辐射之间的反差^[2]。实际上,在遥感器的成像过程中会受到许多因素的影响,比如:目标的几何形状和大小、目标的光谱反射特性、大气的散射和

衰减、太阳的方位和高度角、遥感器自身的辐射响应特性以及观测的日期、时间、地理位置和几何关系等。遥感器第 i 个像元输出的 DN 值是其对应的瞬时视场 (IFOV) 内接收到的积分辐射通量的函数,即:

$$DN_i = f(H_i) .$$

函数 f 代表了遥感器焦平面探测器的辐射响应关系,在探测器光谱响应为线性的情况下,该函数关系可简化为如下形式:

$$DN_i = DN_{i0} + \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R_i(\lambda) H_i(\lambda) d\lambda \cong DN_{i0} + \bar{R}_i \cdot H_i, \quad (1)$$

其中: DN_{i0} 表示第 i 个像元的暗信号输出, $R_i(\lambda)$ 为阵列探测器第 i 个像元的绝对光谱响应度, \bar{R}_i 为第 i 个像元在其工作波段内的加权平均响应度。

第 i 个像元接收到的光谱辐射通量 $H_i(\lambda)$ 来自于其对应的遥感器入瞳辐亮度的贡献,根据如图 1 所示的成像几何关系和辐射能量传输及守恒定律可知:

$$H_i(\lambda) = L_i(\lambda) \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{D}{f}\right)^2 \cdot A_d \cdot \tau_o(\lambda), \quad (2)$$

其中: $L_i(\lambda)$ 为入瞳光谱辐亮度, D/f 为光学系统的相对孔径, A_d 为单个像元面积, τ_o 为光学系统的透过率。

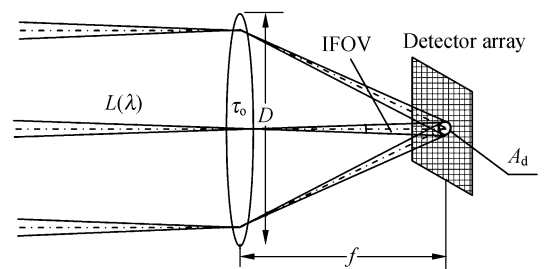


图 1 遥感器单个像元接收的辐射通量示意图
Fig. 1 Schematic diagram of radiant flux received by single pixel of a remote sensor

可见,单个像元接收的辐射通量取决于入瞳辐亮度、像元面积、光学系统相对孔径以及透过率的大小。一旦光学系统参数和探测器型号确定下来,任意像元的输出将由入瞳辐亮度的大小来决定,所以对于遥感器来说目标与背景间的反差体现在入瞳辐亮度的差异上。

在朗伯地表假定条件下,到达传感器入瞳处 的积分辐射亮度可以表示为:

$$L_{\text{target}} \cong \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left\{ \tau_{\text{atm}}^{\text{target-sat}}(\lambda) \cdot \frac{\rho_{\text{target}}(\lambda)}{\pi} \cdot [E_{\text{dir}}(\lambda) + E_{\text{skylight}}(\lambda)] + L_{\text{parth}}(\lambda) \right\} d\lambda, \quad (3)$$

其中: $\tau_{\text{atm}}^{\text{target-sat}}(\lambda)$ 为目标到传感器路径的大气光谱透射比, $\rho_{\text{target}}(\lambda)$ 为目标的光谱反射率, $E_{\text{dir}}(\lambda)$ 为目标处的太阳直射光谱辐照度, $E_{\text{skylight}}(\lambda)$ 为天空散射光谱辐照度, $L_{\text{parth}}(\lambda)$ 为大气程辐射亮度。

式(3)中只有目标光谱反射率 $\rho_{\text{target}}(\lambda)$ 一项能够反映目标自身的物理属性,其它各项都可以看作是干扰信号,它们会造成目标信号强度和对比度下降。另外,考虑到地气耦合即交叉辐射的影响,目标像元接收的辐射通量除目标自身辐射外还包含周围背景散射的贡献,这进一步降低了目标/背景对比度,使得目标和背景更加不易区分。

3 典型舰船目标与海水对比度分析及计算

地物光谱特性是选择传感器最佳工作波段的依据,图 2 所示分别为南海附近深海水域海水和深灰色舰船目标的光谱反射率实测数据曲线,可见舰船和海水之间在各光谱波段都存在着不同程度的反差,这为发现和识别目标提供了可能性。

根据上文分析,对传感器来说目标和背景之间的反差或对比最终由入瞳辐射亮度的差异决定。

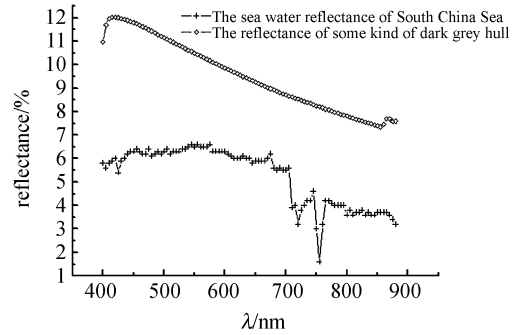


图 2 深灰色船体与南海海水光谱反射率对比

Fig. 2 Comparison of reflectance between dark grey hull and seawater of South China Sea

为了定量地比较这个差异的大小,从舰船目标和海水反射率测量数据出发,利用中分辨率大气辐射传输模型软件 MODTRAN 4.0 模拟实际观测几何和大气条件^[3],计算了在热带夏季第 150 天、海洋气溶胶、气象视距 23 km、太阳高度角 30°的条件下,卫星垂直向下观测时,舰船目标、海水背景以及大气后向散射在入瞳处产生的 0.40~0.88 μm 各光谱波段内的辐亮度值,并给出各光谱波段内的舰体/海水对比度,见表 1。

表 1 海水和深灰色舰体目标在 0.40~0.88 μm 各光谱波段内产生的入瞳辐亮度对比

Tab. 1 Contrast between radiances at entrance pupil generated by seawater and grey hull target at different wavebands within 0.40~0.88 μm

Wavebands (μm)	Radiances at entrance pupil (W/m ² · sr)			Contrast	
	Atmosphere	Seawater	Grey hull	Hull/Seawater	Hull/Atmosphere
0.40~0.44	1.57	2.00	2.33	0.17	0.48
0.44~0.48	1.48	2.04	2.51	0.23	0.70
0.48~0.52	1.10	1.66	2.06	0.24	0.87
0.52~0.56	0.83	1.45	1.77	0.22	1.13
0.56~0.60	0.63	1.11	1.41	0.27	1.24
0.60~0.64	0.50	0.99	1.29	0.30	1.58
0.64~0.68	0.42	0.90	1.12	0.24	1.67
0.68~0.72	0.33	0.66	0.91	0.38	1.76
0.72~0.76	0.27	0.50	0.73	0.46	1.70
0.76~0.80	0.21	0.44	0.67	0.52	2.19
0.80~0.84	0.17	0.36	0.55	0.53	2.24
0.84~0.88	0.16	0.38	0.55	0.45	2.44

从辐射亮度大小来看,舰体目标和海水背景都是短波附近信号较强,这主要是由于大气散射在短波贡献较多的缘故。但从舰体/海水对比度来看近红外光谱区域高于可见波段,同时舰体/大气程辐射之间的对比也随波长增加呈上升趋势,从这点来说近红外光谱波段更加有利于海洋目标的提取。

4 目标信噪比分析及估算

信噪比是衡量遥感器成像和辐射性能的重要指标,信噪比的大小能够反映遥感器对目标辐射的探测能力,对于目标的探测和识别来说一般要求信噪比至少不低于 10 倍(或 20 dB)。为了对遥感器在各光谱波段内观测目标的信噪比做出定量评价,首先必须从理论上了解信噪比产生的物理机制。

在遥感器成像的辐射传输和光电转换过程中不可避免地会受到各种类型噪声的干扰,主要包括:光子散粒噪声、暗电流散粒噪声、读出噪声、热噪声、放大器噪声以及量化噪声等^[4],其中光子散粒噪声、暗电流散粒噪声和读出噪声为噪声的主要来源。光子散粒噪声在数值上等于信号电子数的平方根,暗电流散粒噪声为暗信号电子数的平方根,读出噪声的均方根值 σ_R 可以从器件参数列表中获得。以上 3 种噪声为独立不相关的噪声源,按照误差的独立作用原理可知总噪声电子数为

$$N_{e-} = \sqrt{S_{e-} + D_{e-} + \sigma_R^2} .$$

信噪比定义为信号电子数与噪声电子数的比值,即

$$SNR = \frac{S_{e-}}{N_{e-}} \cong \frac{S_{e-}}{\sqrt{S_{e-} + \sigma_R^2 + D_{e-}}} , \quad (4)$$

式中: S_{e-} 为信号电子数, σ_R 为焦平面 CCD 探测器读出噪声的均方根值, D_{e-} 为暗信号电子数。

信号电子数可由下式(推导过程略)计算得到

$$S_{e-} = \frac{\pi(1-\epsilon)A_d t_{int}}{4(F^\#)^2 hc} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \lambda L(\lambda) \eta(\lambda) \tau_o(\lambda) d\lambda , \quad (5)$$

式中:

A_d —CCD 探测器单个像元的面积;

ϵ —光学系统的遮拦比;

t_{int} —CCD 的积分时间;

$F^\#$ —光学系统的焦比;

$L(\lambda)$ —入瞳处接收的光谱辐射亮度;

$\tau_o(\lambda)$ —光学系统的光谱透过率;

$\eta(\lambda)$ —探测器在波长 λ 处的量子效率;

h —普朗克常数, $6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$;

c —真空中的光速, $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

把遥感器的光学系统参数、探测器参数以及入瞳辐亮度值代入式(5)和式(4),即可计算得到各光谱通道的信噪比(见图 3)。

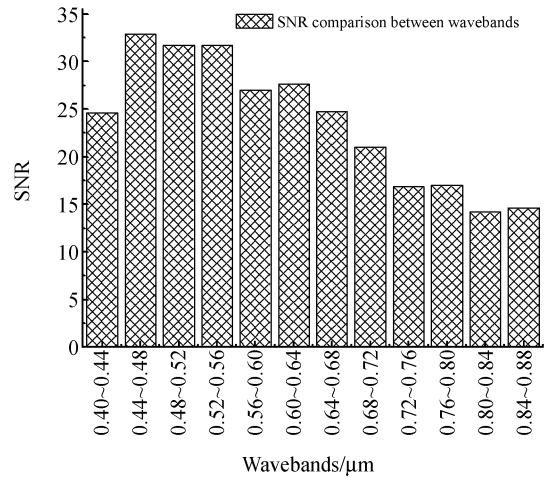


图 3 不同波段信噪比估算结果比较

Fig. 3 Comparison of calculated SNR between different wavebands

5 结 论

从理论估算结果来看,短波波段虽然辐射信号较强、信噪比较好,但大气后向散射影响比较大,目标与背景之间的对比度较小,因此不利于目标的提取和识别。近红外波段辐射信号较弱、信噪比稍差,但是目标/背景对比度较大,利于目标的探测。

根据上述分析,综合考虑目标/背景对比度和信噪比对目标探测的影响,认为宽波段光学遥感器应选取 $0.5 \sim 0.9 \mu\text{m}$ 作为工作波段,多光谱遥感仪器则应根据所感兴趣目标的自身光谱特点、大气窗口以及探测器的光谱响应等具体分析来确定光谱通道^[5-7]。

参考文献:

- [1] 徐根兴. 目标和环境的光学特性[M]. 北京: 宇航出版社, 2005.
XU G X. *Optical Characteristics of Target and Environment* [M]. Beijing: China Astronautics Publishing House, 2005. (in Chinese)
- [2] 周立伟. 目标探测与识别[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004.
ZHOU L W. *Detection and Recognition of Targets* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2004. (in Chinese)
- [3] 吴北婴, 李卫, 陈洪滨, 等. 大气辐射传输实用算法[M]. 北京: 气象出版社, 1998.
WU B Y, LI W, CHEN H B, *et al.*. *Utility Algorithms for Atmospheric Radiation Transmission* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1998. (in Chinese)
- [4] 姜景山. 空间科学与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
JIANG J SH. *Space Science and Application* [M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese)
- [5] PRICE J C. Spectral band selection for visible-near infrared remote sensing: spectral-spatial resolution tradeoffs; Geo-science and Remote Sensing[J]. *IEEE Transactions*, 1997, 35(5):1277-1285.
- [6] 范伟, 王毅, 饶瑞中, 等. 根据大气辐射特征进行目标探测的波段选择[J]. 红外与激光工程, 2005, 34(2):177-182.
FAN W, WANG Y, RAO R ZH, *et al.*. Waveband selection method for target detection based on characteristics of atmosphere radiation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(2):177-182. (in Chinese)
- [7] 牛晔, 张宇烽, 李永强. 卫星光学遥感器光谱波段选择的影响因素[J]. 航天返回与遥感, 2004, 25(3):9-29.
NIU Y, ZHANG Y F, LI Y Q, Influence on spectral band selection for satellite optical remote sensor [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2004, 25(3):9-29. (in Chinese)

作者简介: 万志(1973—), 男, 吉林长春人, 助理研究员, 博士研究生, 主要研究方向为空间光学遥感器的辐射定标和像质评价。E-mail: wz7307@yahoo.com.cn

任建岳(1952—), 男, 吉林长春人, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为光学遥感器的研制和性能评价。

●下期预告

高安全 VPN 的嵌入式 PPPoE 接入研究

于晓^{1,2}, 隋永新², 杨怀江², 王欣³, 赵铭¹

(1. 空军航空大学训练部, 吉林长春 130022; 2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林长春 130033; 3. 吉林大学计算机科学与技术学院, 吉林长春 130012)

提出了一种高强度的 VPN 安全通信解决方案, 该方案将 VPN 的安全协议脱离操作系统, 嵌入到网络设备(安全网卡)之中, 使得任何程序在使用网络设备时无法绕开安全协议, 从而使系统在完成保密通信的同时具有防止主动攻击的能力。介绍了安全网卡的硬件平台和内部软件结构; 讨论了该 VPN 的多种接入方式。给出了在安全网卡内部基于 PPPoE 协议 ADSL 宽带接入 VPN 的实现方法, 经验证该方法达到了预期的结果。